



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK

## Analyse af simpelt brudforsøg

Nielsen, Søren Dam; Nielsen, Benjamin Nordahl

*Publication date:*  
2019

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*  
Nielsen, S. D., & Nielsen, B. N. (2019). *Analyse af simpelt brudforsøg*. (1 udg.) Aalborg Universitet, Institut for Byggeri og Anlæg. DCE Lecture notes Nr. 70

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

---

# Analyse af Simpelt Brudforsøg (simpelt triaxialforsøg)

---

Søren Dam Nielsen og Benjamin Nordahl Nielsen

12. marts 2019

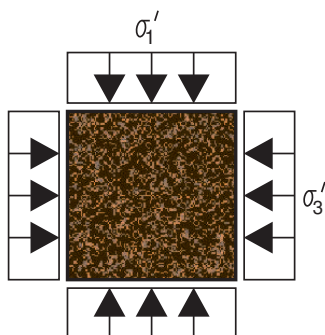
## Formål

Denne note er skrevet med det formål at give studerende på Byggeri og Anlæg 2. semester en introduktion til at analysere resultaterne fra et simpelt brudforsøg (simpelt triax) udført på sand. Forsøgets formål er at bestemme friktionsvinklen ( $\phi$ ) ved at udføre forsøg med forskellige belastninger. Det skal bemærkes at dette forsøg kun bør anvendes til undervisning, da forsøget er for upræcist. Derimod giver forsøget mulighed for hurtigt (og simpelt) at forstå hvordan brudbetingelsen for sand er fremkommet. Bemærk yderligere at der er påkrævet brug af sikkerhedssko ved udførelse af laboratorieforsøg, og at gældende sikkerhedsregler i laboratoriet skal overholdes.

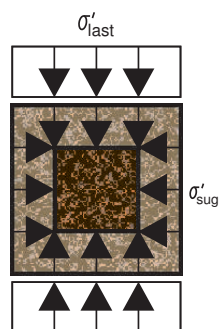
## Spændingstilstande

Spændinger i jord defineres hovedsageligt ud fra den største ( $\sigma'_1$ ) og mindste ( $\sigma'_3$ ) effektive hovedspænding på et jordlegeme, som vist på Figur 1. I et konventionelt triaxialforsøg udgør kammertrykket  $\sigma'_3$  og summen af kammertryk og belastning udgør  $\sigma'_1$ .

Ved et simpelt triaxialforsøg udføres forsøget ikke inde i et kammer (celle), hvorfor kammertrykket er nul. I stedet for et positivt ydre kammertryk, påføres et negativt indvendigt tryk (undertryk), som holder prøven sammen, som illustreret på Figur 2.  $\sigma'_3$  kan regnes, som den positive værdi af dette sug jvf. ligning (1).  $\sigma'_1$  kan regnes som spændingen fra belastningen adderet med den positive værdi af suget (fratrullet den negative værdi) jvf. ligning (2).



Figur 1: Spændingstilstand i et konventionelt triaxial forsøg



Figur 2: Spændingstilstand i et simpelt triaxial forsøg

$$\sigma_3 = -\sigma_{sug} \quad (1)$$

$$\sigma_1 = \sigma_{last} - \sigma_{sug} \quad (2)$$

hvor  $\sigma_{sug}$  antager en negativ værdi (tryk er positivt) og  $\sigma_{last}$  er belastningen fordelt ud over prøvens tværsnit. Forskydningsspændingen ( $\tau$ ) er defineret ved:

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (3)$$

## Brudbetingelse

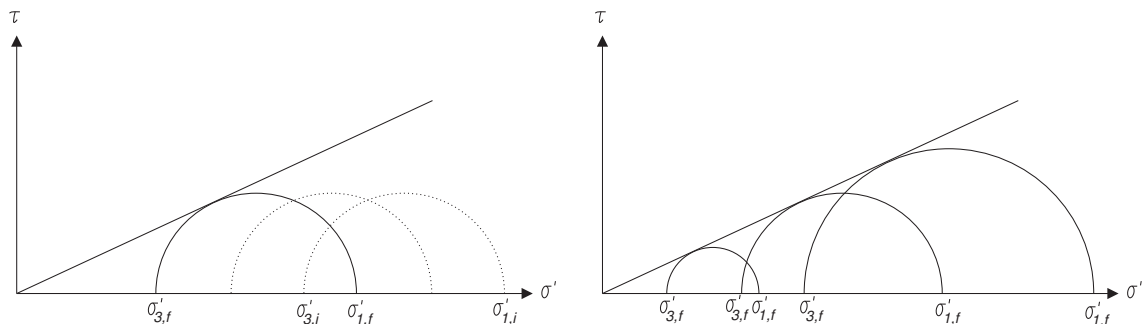
Der vil herunder blive beskrevet to metoder til at bestemme brudbetingelsen. For et konventionelt triaxialforsøg er proceduren beskrevet i Lærebog i Geoteknik Kapitel 7. I Denne note er beregningen og figurer tilpasset et simpelt brudforsøg. Den første metode tager udgangspunkt i Mohrske cirkler, som giver den læringsmæssige bedste forståelse. Den anden metode (i noten kaldet "b og  $\beta$ ") er derimod lettere at bruge i praksis.

### Metode 1: Mohrske cirkler

Brudbetingelsen beskriver den spændingstilstand, som medfører brud i jordelementet. Brudbetingelsen afbildes i et diagram, som viser forskydningsspændingen ( $\tau$ ) som funktion af de effektive normalspændinger ( $\sigma'$ ). For en kohæsionsløs jord afhænger brudbetingelsen udelukkende af friktionsvinklen ( $\phi$ ) og de effektive spændinger ( $\sigma'$ ). Med denne antagelse bliver Mohr-Coulomb brudbetingelsen

$$\tau = \sigma' \tan \phi \quad (4)$$

hvoraf det fremgår at hældningen på brudlinjen er  $\tan \phi$ . Ved at optegne spændingstilstanden ved brud med Mohrske cirkler i et  $\tau - \sigma'$  diagram for en række forsøg, kan en ret linje fittes, således den tangere alle cirkler (se Figur 3). Hældningen af denne linje, som er brudbetingelsen, er  $\tan \phi$ . For kohæsionsløs jord går brudbetingelsen gennem (0,0). Figur 3 illustrerer til venstre hvordan den Mohrske cirkel udvikler sig fra start til brud under et forsøg. Til højre illustrerer figuren en ret linje fittet til tre Mohrske cirkler, hvor hver cirkel repræsenterer spændingstilstanden ved brud for et enkelt forsøg.



Figur 3: Brudbetingelse fitted til forsøgsresultater. Figuren til venstre viser udviklingen af den Mohrske cirkel fra start til brud for et enkelt forsøg. Højresiden viser Mohrske cirkler ved brud for 3 forsøg med forskellig belastning. Inden  $i$  henviser til en initial tilstand og  $f$  henviser til en brudtilstand (failure).

### Metode 2: b og $\beta$

Denne beregning er undret, i forhold til den i Lærebog i Geoteknik beskrevne fremgangsmåde. Der henvises derfor hertil.

## Eksempel

Dette eksempel tager udgangspunkt i et brudforsøg på Baskarp Sand nummer 1. Forsøgsresultaterne er angivet i Tabel 1.

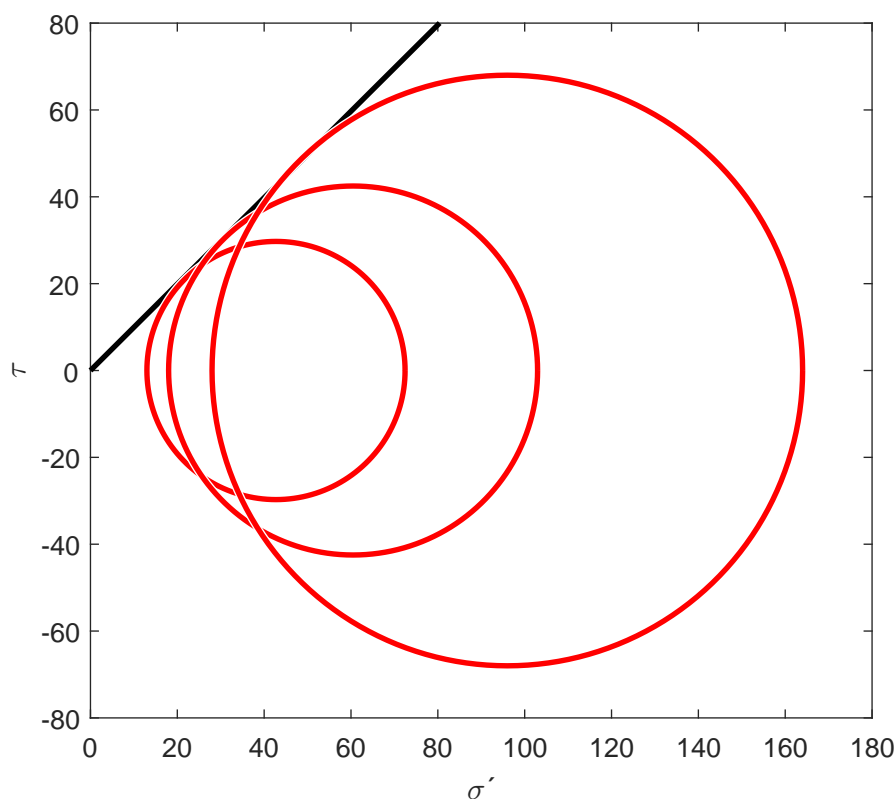
Tabel 1: Forsøgsresultater fra brudforsøg.

Forsøgsnummer	Mindste hovedspænding ved brud	største hovedspænding ved brud
	$\sigma'_{3,f}$	$\sigma'_{1,f}$
1	13 kPa	72.5 kPa
2	18 kPa	103.0 kPa
3	28 kPa	164.0 kPa

Ved metode 2 antages sandet at være et kohæsionsløst materiale, og dermed  $b = 0$ . En ret linje fittes herefter og  $\beta$  findes til  $11.8^\circ$ , hvorefter  $\phi$  bestemmes til  $44.9^\circ$  ud fra

$$\sin \phi = \frac{1}{1 + 2 \tan \beta} \quad (5)$$

Løses dette ud fra metode 1 med Mohrske cirkler findes friktionsvinklen ligeledes til  $44.9^\circ$ , hvor de Mohrske cirkler er illustreret jvf. Figur 4. Som illustreret tangere brufbetingelsen de Mohrske cirkler ved brud.



Figur 4: Brudbetingelse fittet til Mohrske cirkler.

Derudover kan arbejdskurven med fordel optegnes, for at sikre et korrekt deformationsforløb under forsøget.

## Triaxial og plan friktionsvinkel

Ved brudforsøget findes den triaxiale friktionsvinkel ( $\phi_{tr}$ ), som beskriver et brud i 3 dimensioner. Ved f.eks. stribefundamenter antages en plan tøjningstilstand, hvorfor den plane friktionsvinkel skal anvendes. Da jorden er fastholdt i én retning øges styrken, og den plane friktionsvinkel ( $\phi_{pl}$ ) kan tilnærmed ved at øge den triaxiale friktionsvinkel med 10 % jvf. ligning (5).

$$\phi_{pl} = 1,1 \phi_{tr} \quad (6)$$